Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026

سال اول، شماره‌هاي۱و۲، پاییز و زمستان ۱۳۸۷
صص: ۱- ۸

فصلنامه علمي-پژوهشي
فنّاوری اطلاعات و ارتباطات ایران

تأثیر عدم توازن IQ برنرخ خطای بیت مدولاسیون تطبیقی در سیستم‌های MIMO

محمد رضا کشاورزی*[۱] عباس محمدی* عبدالعلی عبدی‌پور*

* آزمایشگاه تحقیقاتی مایکروویو/ موج میلیمتری و مخابرات بدون سیم،
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله تاثیر عدم توازن IQ[۲] بر مدولاسیون تطبیقی MQAM در سیستم‌های MIMO با گیرنده تبدیل مستقیم[۳]، بررسی می‌شود. مدولاسیون تطبیقی توان-پیوسته نرخ-گسسته در سیستم‌های MIMO به همراه اطلاعات کامل کانال[۴] در فرستنده و گیرنده، در نظر گرفته می‌شود. مکانیزم تطبیق انتخاب شده به این صورت است که توان ارسالی و منظومه[۵] ارسالی تحت محدودیت‌های توان ارسالی متوسط و احتمال خطای بیت[۶] (BER) لحظه‌ای، تغییر داده می‌شود تا بازده طیفی متوسط[۷] ماکزیمم شود. در ابتدا رابطه بسته‌ای برای احتمال خطای بیت مدولاسیون MQAM تحت تاثیر عدم توازن IQ معرفی می‌شود سپس تاثیر عدم توازن IQ، بر اساس روابط تحلیلی، بر نرخ خطای بیت مدولاسیون تطبیقی در MIMO بررسی می‌شود. همچنین میزان این تاثیر به ازاء تعداد مختلف آنتن فرستنده و گیرنده مشاهده خواهد شد. نتایج روابط تحلیلی حاصل از این مقاله با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو نیز مقایسه می‌شوند تا میزان صحت این روابط بررسی شود.

کلیدواژگان: مدولاسیون تطبیقی، نرخ خطای بیت، عدم توازن IQ، MIMO

۱- مقدمه

مدولاسیون تطبیقی یک روش نیرومند برای رسیدن به نرخ داده زیاد می‌باشد که در مراجع [۱-۳] به آن اشاره شده است. روش مدولاسیون تطبیقی به این صورت است که از طریق تطبیق چند پارامتر در فرستنده مانند منظومه مدولاسیون[۱]، توان ارسالی و پارامترهای کدینگ، بازده طیفی متوسط را ماکزیمم می‌کند. این تطبیق بر اساس اطلاعات حالت کانال که از گیرنده به فرستنده فیدبک می‌شود، پایه ریزی شده است. بنابراین مدولاسیون تطبیقی به تخمین دقیق کانال در گیرنده و یک مسیر فیدبک مطمئن بین گیرنده و فرستنده نیاز دارد. تأثیرات خطای تخمین و تأخیر فیدبک بر مدولاسیون تطبیقی در [۴-۵] مطالعه شده‌اند. طراحان سیستم‌های بدون سیم، ترکیب مدولاسیون تطبیقی با روشهای چند- ورودی چند- خروجی[۲] را پیشنهاد نموده‌اند. زیرا اضافه کردن بعد فضایی به سیستم‌های مدولاسیون تطبیقی، بازده طیفی را به مقدار بسیار زیادی می افزاید و در نتیجه سیستم‌های مخابراتی بدون سیم با سرعت زیاد قابل حصول می‌باشند.

از طرف دیگر، سادگی ساختار گیرنده تبدیل مستقیم[۳] و امکان پیاده سازی یکپارچه، باعث جذابیت آن در مخابرات بدون سیم می‌شود. اگرچه این ساختار متحمل مشکلات زیادی از ناحیه بعضی از معایب RF می‌شود. یکی از معایب گیرنده‌های تبدیل مستقیم عدم توازن بین مسیرهای I و Q می‌باشد [۶]. عدم توازن IQ [۴] در عرض باندهای کوچک (مانند

---

۱. نویسنده عهده‌دار مکاتبات (mrkeshavarzi@aut.ac.ai)

۲.IQ imbalance
۳.Direct conversion receiver
۴.Perfect channel state information
۵.Constellation
۶.Bit error rate
۷.Average spectral efficiency

۱.Modulation constellation
۲.Multiple-input multiple-output (MIMO)
۳.Direct conversion receiver
۴.IQ imbalance

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026

سیستم‌های سلولار واقعی) غالبا مستقل از فرکانس می‌باشد. روشهای دیجیتالی برای جبران سازی عدم توازن IQ وجود دارند که البته باعث حذف کامل آن نمی‌شوند[۷] و [۸]. تأثیرات عدم توازن IQ بر آشکارسازی OFDM-QAM در [۹] مورد مطالعه قرار گرفته است اگرچه در این مقاله رابطه BER تحت تأثیر عدم توازن IQ فقط برای QPSK محاسبه شده است. بعضی از مقالات عدم توازن IQ را به عنوان تداخل فرض کرده‌اند و سپس در این حالت SNR تنزل یافته را محاسبه نموده‌اند و برای این محاسبه، تداخل را با AWGN [۱] تقریب زده‌اند[۱۰]. تأثیر عدم توازن IQ بر بازده سیستم M-QAM در [۱۱] نشان داده شده است. این مرجع احتمال خطای سمبل را در سیستم OFDM تحت تاثیر عدم توازن IQ محاسبه نموده است. ما در [۱۲] به روش دیگری احتمال خطای بیت M-QAM را تحت تأثیر عدم توازن IQ محاسبه نموده ایم. عدم توازن IQ در سیستم‌های MIMO نیز در بعضی از مقالات مطالعه شده است [۱۳-۱۵]. در این سه مقاله راجع به تخمین و جبران سازی و نحوه مدل کردن سیگنال بحث شده است ولی هیچ نوع رابطه دقیقی برای BER استخراج نشده است و فقط به شبیه‌سازی اکتفا شده است.

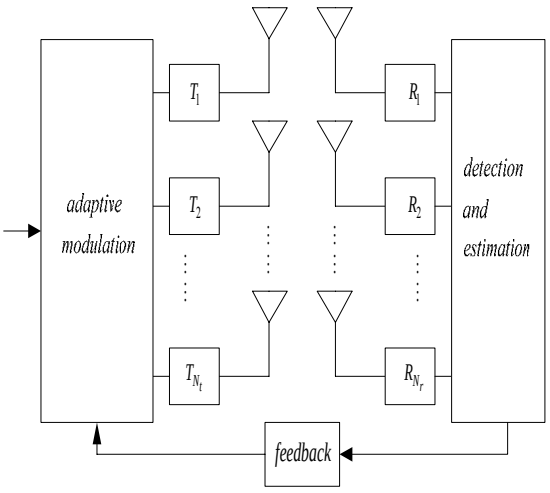
چندین روش نیز برای کاهش عدم توازن IQ پیشنهاد شده است که در این مقاله موضوع مورد نظر ما نیست. تا کنون تأثیر عدم توازن IQ بر مدولاسیون تطبیقی در سیستم MIMO بررسی نشده است. در این مقاله، تأثیر عدم توازن IQ بر مدولاسیون تطبیقی M-QAM در سیستم MIMO استخراج می‌شود. برای بررسی بازده مدولاسیون تطبیقی در MIMO ، یک رابطه BER برای M-QAM تحت تأثیر عدم توازن IQ لازم است که ما از رابطه BER ای که در [۱۲] استخراج نموده‌ایم، استفاده می‌کنیم.

در اینجا یک سیستم MIMO که دارای گیرنده‌هایی با ساختار تبدیل مستقیم است، در نظر گرفته می‌شود. تمام گیرنده‌ها تحت تاثیر عدم توازن IQ می‌باشند. سپس تکنیک مدولاسیون تطبیقی در MIMO [۲] انجام می‌شود. این تکنیک نرخ نرخ و توان ارسالی را طوری بهینه می‌کند تا بازده طیفی [۳] تحت محدودیت های BER و متوسط توان [۴]، ماکزیمم شود [۲]. به علاوه احتمال خطای بیت مدولاسیون M-QAM تطبیقی در MIMO نیز بدست خواهد آمد. نتایج احتمال خطای بیت ناشی از محاسبات و شبیه‌سازی با هم مقایسه خواهند شد.

ساختار این مقاله به شرح ذیل است : در قسمت ۲ شمای کلی سیستم توصیف می‌شود. مدل تطبیق در سیستمهای MIMO در قسمت ۳ بررسی می‌شود. مدل عدم توازن IQ و تأثیر آن بر سیگنال M-QAM در ۴ مطالعه می‌شود. در قسمت ۵ احتمال خطای بیت مدولاسیون تطبیقی MIMO تحت تأثیر عدم توازن IQ استخراج می‌شود. نتایج عددی در ۶ نشان داده می‌شوند. همچنین احتمال خطای بیت مدولاسیون تطبیقی M-QAM در MIMO بر حسب پارامترهای عدم توازن IQ و بازده طیفی‌های مختلف در این قسمت نشان داده می‌شود. درقسمت آخر نیز خلاصه نتایج بررسی می‌شود.

۲- شمای کلی سیستم

سیستم تحت توصیف درشکل ۱ نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود در فرستنده و گیرنده چندین آنتن وجود دارد و قسمتهای RF فرستنده و گیرنده نیز نشان داده شده‌اند. کانال در گیرنده تخمین زده می‌شود و به فرستنده فیدبک می‌شود. فرستنده سیگنال ارسالی را بر حسب اطلاعات فیدبک تطبیق می‌کند و در نتیجه بازده طیفی ماکزیمم می‌شود. تمام مسیرهای دریافت تحت تاثیر عدم توازن IQ می‌باشند که این امر باعث تخریب BER نسبت به حالت ایده آل می‌شود. آشکارسازی فاز، همدوس و ایده آل فرض می‌شود و همچنین فرض می‌شود که مسیر فیدبک بدون خطا می‌باشد. تأثیرات خطای تخمین و تأخیر صرفنظر می‌شوند. وجود اطلاعات کانال



شکل ۱: ساختار مدولاسیون تطبیقی در MIMO

۱.Additive white Gaussian noise
۲.MIMO adaptive modulation technique
۳.Spectral efficiency
۴.BER and average power constraints

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026

در فرستنده این قابلیت را به فرستنده می‌دهد که نرخ و توان ارسالی خود را با توجه به تغییرات کانال تطبیق دهد [۲].

در اینجا یک کانال تخت[۱] MIMO (با N_t آنتن فرستنده و N_r آنتن گیرنده) در نظر گرفته می‌شود. کانال با ماتریس $\mathbf{H}$ ($N_r \times N_t$) نمایش داده می‌شود که شامل ضرایب کانال $h_{\mu\upsilon}$ می‌باشد ($h_{\mu\upsilon}$ ضریب کانال بین μامین آنتن فرستنده و υامین آنتن گیرنده می‌باشد). ضرایب کانال $\left\{h_{\mu\upsilon}\right\}_{\mu=1,\upsilon=1}^{N_r,N_t}$ از هم مستقلند و دارای توزیع یکسان گوسی مختلط $CN(0,1)$ می‌باشند. سیگنال ورودی $\mathbf{x}$ ($N_t \times 1$) و سیگنال خروجی ($N_r \times 1$) $\mathbf{y}$ می‌باشد و رابطه بین آنها عبارتست از:

$$\mathbf{y}=\mathbf{H}\mathbf{x}+\mathbf{n} \qquad (۱)$$

که $\mathbf{n}$ ($N_r \times 1$) نویز سفید گوسی جمع شونده می‌باشد و المانهای آن مستقل ودارای توزیع $n_i \sim CN(0,\sigma_n^2)$ می‌باشند. با در نظر گرفتن تعاریف زیر:

$$m \overset{\Delta}{=} \min(N_t, N_r), \qquad n \overset{\Delta}{=} \max(N_t, N_r),$$
$$d \overset{\Delta}{=} n-m \qquad (۲)$$

چنانچه روش تجزیه به مقادیر تکین[۲] به $\mathbf{H}$ اعمال شود، رابطه (۱) به رابطه زیر تبدیل می‌شود.

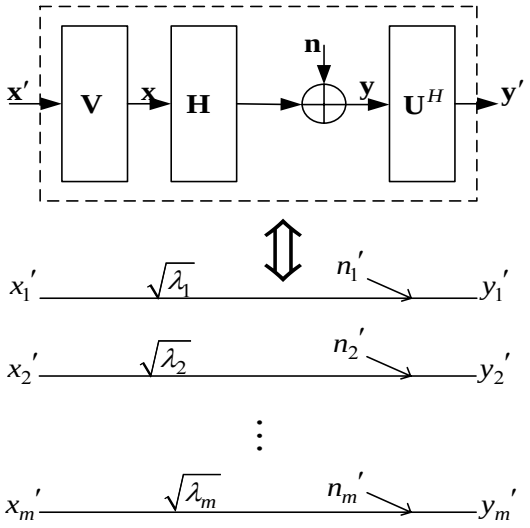
$$\mathbf{y}' = D\mathbf{x}' + \mathbf{n}' \qquad (۳)$$

که

$$\mathbf{y}' \overset{\Delta}{=} \mathbf{U}^H\mathbf{y}, \mathbf{x}' \overset{\Delta}{=} \mathbf{V}^H\mathbf{x}, \mathbf{n}' \overset{\Delta}{=} \mathbf{U}^H\mathbf{n} \qquad (۴)$$

و $\mathbf{U}$، $\mathbf{V}$ و $\mathbf{D}$ اجزاء تجزیه $\mathbf{H}$ می‌باشند یعنی $\mathbf{H}=\mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H$. $\mathbf{U}$ و $\mathbf{V}$ ماتریس‌های یکه[۱] می‌باشند بنابراین توانهای $\mathbf{x}$ و $\mathbf{x}'$ یکسان هستند به همین صورت ($\mathbf{y}$ و $\mathbf{y}'$) و ($\mathbf{n}$ و $\mathbf{n}'$) نیز دارای توانهای یکسان می‌باشند. $\mathbf{D}$ یک ماتریس قطری[۲] است و المان های قطر اصلی آن مقادیر تکین $\mathbf{H}$، $\left\{\sqrt{\lambda_i}\right\}_{i=1}^{m}$ می‌باشند. ساختار معادل تبدیل رابطه (۱) به رابطه (۳) در شکل۲ نشان داده شده است.

۱.Flat
۲.Singular value decomposition (SVD)



شکل۲: تبدیل کانال MIMO به m زیرکانال مستقل SISO

این تبدیل بدان معنی است که با استفاده از روش تجزیه SVD ، کانال MIMO به m زیرکانال موازی و مستقل SISO تبدیل شد. درایه‌های $\mathbf{H}$ متغیرهای تصادفی هستند بنابراین λ (گین توان هر زیر کانال) یک فرآیند تصادفی می‌باشد. تابع چگالی احتمال کناری[۳] هر مقدار ویژه نامرتب[۴] عبارتست از [۱۶]

$$Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1) = \frac{1}{m}\sum_{k=0}^{m-1}\frac{k!}{(k+d)!}\left[L_k^d(\lambda_1)\right]^2\lambda_1^d e^{-\lambda_1} \qquad (۵)$$

که $L_k^d(\lambda_1)$ چند جمله‌ای اشتراکی لاگر[۵] مرتبه kام می‌باشد یعنی

$$L_k^d(\lambda_1) = \sum_{l=0}^{k}(-1)^l\frac{(k+d)!}{(k-l)!(d+l)!l!}\lambda_1^l \qquad (۶)$$

۳- مدولاسیون تطبیقی نرخ گسسته در سیستمهای MIMO

مدولاسیون تطبیقی در سیستم MIMO یک مسأله بسیار پیچیده است اما استفاده از توزیع مقدار ویژه نامرتب، آن را به مسأله مدولاسیون تطبیقی در یک زیرکانال SISO تبدیل می‌کند [۱۷]. بنابراین مسأله زیر باید حل شود

۱.Unitary matrices
۲.Diagonal matrix
۳.Marginal probability density function(pdf)
٤.Unordered eigenvalue
٥.associated Laguerre polynomial

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026

$$\begin{aligned} &\underset{P_1,k_1}{maximize}\ \ ASE = m\varepsilon_{\lambda_1}\left[k_1(\lambda_1)\right] \\ &\varepsilon_{\lambda_1}\left[P_1(\lambda_1)\right] = P/m \\ &BER_1(\lambda_1) = BER_{tgt} \end{aligned} \qquad (۷)$$

که λ_1 گین توان اولین زیرکانال نامرتب می‌باشد. P_1 ،k_1 و BER_1 به ترتیب توان، نرخ و BER لحظه ای اولین زیرکانال نامرتب می‌باشند. ما فقط از ساختار مدولاسیون QAM مربعی استفاده می‌کنیم. بنابراین نرخ های موجود عبارتند از

$$\begin{aligned} &k_1(\lambda_1) \in \{r_0, r_1, \ldots, r_N\} \\ &r_i = 2i \quad i = 0,1,\ldots,N \end{aligned} \qquad (۸)$$

حل مسأله (۷) در مقاله [۲] ارائه شده است. بنابراین روش بهینه تطبیق نرخ و توان عبارتست از

$$\begin{cases} k_1(\lambda_1) = r_i, & \upsilon_i \le \lambda_1 < \upsilon_{i+1} \\ P_1(\lambda_1) = \dfrac{M_i - 1}{\lambda_1}\dfrac{\sigma_n^2}{K}, & \upsilon_i \le \lambda_1 < \upsilon_{i+1} \end{cases} \qquad (۹)$$

که $M_i = 2^{r_i}$ و $K = \dfrac{-1.5}{\ln(5BER_{tgt})}$. υ_i مشخص کننده مرز گین توان است و برابر است با

$$\upsilon_i = \frac{M_i - M_{i-1}}{r_i - r_{i-1}}\frac{\mu}{K} \qquad (۱۰)$$

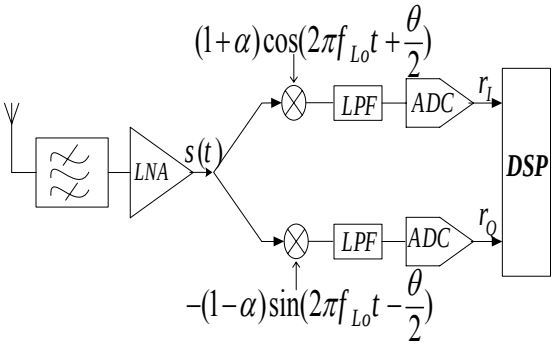
که $\mu > 0$ ضریب لاگرانژ[۱] است و از معادله محدودیت متوسط توان[۲] بدست می آید.

$$\sum_{i=1}^{N}\frac{M_i - 1}{K}\left[\int_{\upsilon_i}^{\infty}\frac{Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1)}{\lambda_1}d\lambda_1 - \int_{\upsilon_{i+1}}^{\infty}\frac{Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1)}{\lambda_1}d\lambda_1\right] = \frac{P}{m\sigma_n^2} \qquad (۱۱)$$

بعد از بدست آوردن μ، بازده طیفی متوسط را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$R = m\sum_{i=1}^{N} r_i\left[\int_{\upsilon_i}^{\infty} Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1)d\lambda_1 - \int_{\upsilon_{i+1}}^{\infty} Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1)d\lambda_1\right] \qquad (۱۲)$$

۱.Lagrangian multiplier
۲.average power constraint



شکل۳: عدم توازن IQ در گیرنده همودین

۴- بررسی تاثیر عدم توازن IQ

از گیرنده تبدیل مستقیم به عنوان ساختار RF سیستم MIMO استفاده می نماییم. لذا قسمت RF مسیرهای مختلف گیرنده MIMO، تحت تاثیر عدم توازن IQ می‌باشد که بازده مدولاسیون تطبیقی درسیستم MIMO را تخریب می‌نماید.

شمای عدم توازن IQ در یک گیرنده همودین، در شکل ۳ نشان داده شده است. عدم توازن IQ توسط آخرین بخش قسمت آنالوگ گیرنده بوجود می‌آید. عدم توازن به صورت یک میکسر تربیعی[۱] دارای سیگنال اسیلاتور محلی نامتوازن که با رابطه (۱۳) بیان شده است، مدل می‌شود.

$$\begin{aligned} x_{LO}(t) &= (1+\alpha)\cos(2\pi f_{Lo}t + \frac{\theta}{2}) \\ &\quad - j(1-\alpha)\sin(2\pi f_{Lo}t - \frac{\theta}{2}) \end{aligned} \qquad (۱۳)$$

که θ و α به ترتیب عدم توازن فاز و دامنه بین شاخه‌های I و Q می‌باشند و همچنین $f_{Lo} = f_c$. عدم توازن فاز، هرگونه انحراف فاز از فاز ایده آل 90° بین شاخه‌های I و Q می‌باشد. بنابراین سیگنال دریافتی $s(t)$ با $x_{LO}(t)$ میکس تربیعی می‌شود و سیگنال منتجه پس از فیلتر پایین گذر و A/D به سیگنال باند پایه $r_I(k), r_Q(k)$ تبدیل می‌شود [۱۲].

$$\begin{aligned} r_I(k) &= (\alpha+1)\cos(\frac{\theta}{2})s_I(k) - (\alpha+1)\sin(\frac{\theta}{2})s_Q(k) \\ r_Q(k) &= -(1-\alpha)\sin(\frac{\theta}{2})s_I(k) + (1-\alpha)\cos(\frac{\theta}{2})s_Q(k) \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

۱.Quadrature

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026

در حالـــت ایـــده آل $\alpha=0, \theta=0$ و $r_I=s_I$ و $r_Q=s_Q$. اگر یک سیستم SISO در گیرنده خود دارای عـدم توازن IQ باشد و یک سیگنال MQAM از فرستنده ارسال شـود آنگاه پس از انجام محاسبات، BER را بصـورت زیـر محاسـبه نمودیم [۱۲].

$$P_{e,IQ_\mathrm{Im}(Mj)} \cong \frac{2\left(1-1/\sqrt{Mj}\right)}{M_j \log_2\sqrt{M_j}} \sum_{\substack{i=1\\ odd}}^{\sqrt{M_j}-1} \sum_{\substack{j=1-\sqrt{M_j}\\ odd}}^{\sqrt{M_j}-1} \left\{ Q\left(((1+\alpha)(i\cos\frac{\theta}{2}+j\sin\frac{\theta}{2})-(i-1))\sqrt{\frac{3\gamma_s}{(M_j-1)(1+\alpha^2)}}\right) Q\left(((1-\alpha)(i\cos\frac{\theta}{2}+j\sin\frac{\theta}{2})-(i-1))\sqrt{\frac{3\gamma_s}{(M_j-1)(1+\alpha^2)}}\right)\right.$$

(۱۵)

که γ_S مشخص کننده نسبت توان سیگنال دریـافتی بـه σ_n^2، (سیگنال به نویز دریافتی سـمبل) مـی‌باشـد و i و j اعـداد فـرد می‌باشند.

۵- بررسـی بـازده BER مدولاسـیون تطبیقـی در MIMO تحت تاثیر عدم توازن IQ

هـدف ایـن قسـمت اسـتخراج تـأثیر عـدم تـوازن IQ بـر مدولاسیون تطبیقی در سیستم‌های MIMO می‌باشد. فـرض می‌شود که پارامترهای عدم توازن فاز و دامنـه (θ و α)، در همه زیرکانالها یکسان می‌باشند بنابراین احتمال خطـای بیت کـل برابـر اسـت بـا میـانگین BER درهـر زیرکانـال. میانگین BER در هر زیرکانال را به صـورت زیـر محاسـبه می‌نماییم.

= متوسط نرخ خطای بیت

$$\frac{\sum_{j=1}^{N} P_e(M_j)\times\log_2(M_j)P(\upsilon_j\le\lambda_1<\upsilon_{j+1})}{\sum_{j=1}^{N}\log_2(M_j)P(\upsilon_j\le\lambda_1<\upsilon_{j+1})}$$

(۱۶)

که $P_e(M_j)$ نرخ خطای بیت متناظر بـا M_j مـی‌باشـد و $P(\upsilon_j\le\lambda_1<\upsilon_{j+1})$ احتمال آن است کـه λ_1 در j امـین ناحیه قرار بگیرد بنابراین داریم:

$$p(\upsilon_j\le\lambda_1<\upsilon_{j+1})=\int_{\upsilon_j}^{\upsilon_{j+1}} Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1)d\lambda_1 \quad (۱۷)$$

عدم توازن IQ باعث می‌شود که متوسط نرخ خطـای بیـت از BER_{tgt} بزرگتر باشد. با توجه به رابطه (۹) می‌تـوان بیـان نمود که

= توان سیگنال دریافتی

$$\lambda_1 P_1(\lambda_1)=\frac{-2\ln(5BER_{tgt})\sigma_n^2}{3}(M_i-1)$$

(۱۸)

بنابراین با توجه به رابطه (۱۵)، $P_e(M_j)$ تحـت تـأثیر عدم توازن IQ در حالت مدولاسیون تطبیقی را به صورت زیـر بدست می‌آوریم.

$$P_{e,IQ_\mathrm{Im}(Mj)} \cong \frac{2\left(1-1/\sqrt{Mj}\right)}{M_j \log_2\sqrt{M_j}} \sum_{\substack{i=1\\ odd}}^{\sqrt{M_j}-1} \sum_{\substack{j=1-\sqrt{M_j}\\ odd}}^{\sqrt{M_j}-1} \left\{ Q\left(((1+\alpha)(i\cos\frac{\theta}{2}+j\sin\frac{\theta}{2})-(i-1))\sqrt{\frac{-2\ln(5BER_{tgt})}{(1+\alpha^2)}}\right) Q\left(((1-\alpha)(i\cos\frac{\theta}{2}+j\sin\frac{\theta}{2})-(i-1))\sqrt{\frac{-2\ln(5BER_{tgt})}{(1+\alpha^2)}}\right)\right.$$

(۱۹)

درنهایـت بـر اسـاس ایـن محاسـبات نـرخ خطـای بیـت کـل مدولاسیون تطبیقی در MIMO تحت تأثیر عدم توازن IQ را بـه صورت رابطه بسته زیر بیان می‌نماییم.

$$BER_{IQim}=\frac{\sum_{j=1}^{N}\left[P_{e,IQ_\mathrm{Im}}(M_j)\times\log_2(M_j)\times\int_{\upsilon_j}^{\upsilon_{j+1}}Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1)d\lambda_1\right]}{\sum_{j=1}^{N}\left[\log_2(M_j)\times\int_{\upsilon_j}^{\upsilon_{j+1}}Pdf_{\lambda_1}(\lambda_1)d\lambda_1\right]}$$

(۲۰)

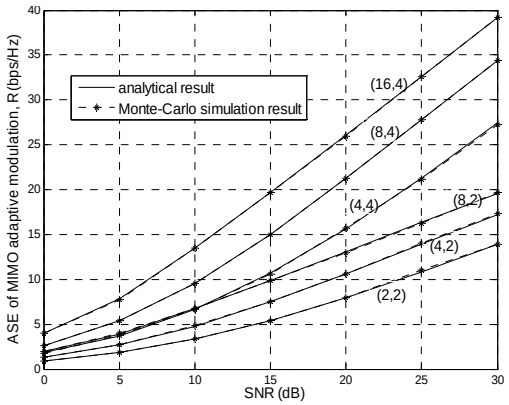
۶- نتایج عددی

در ایـن قسـمت میـزان تخریـب BER مدولاسـیون تطبیقـی در سیستم‌های MIMO، تحت تأثیر عدم توازن IQ نشان داده مـی‌شـوند این نتایج به ازاء ۶ ترکیب مختلف آنتن فرستنده-گیرنده نمـایش داده مـی‌شـوند. فـرض مـی‌شـود کـه نـرخ هـای موجـود عبارتنـد از

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026

$k_1(\lambda_1) \in \{0,2,4,6,8,10\}$. فرض دیگر آن است که تخمین کانال بدون خطا و صحیح می‌باشد. بنابراین با توجه به توصیفات فوق الذکر، عدم توازن IQ بر میانگین بازده طیفی کل، R، تأثیری ندارد. با توجه به این مفروضات تنها پارامتری که R را به ازاء سیگنال به نویز ارسالی تعیین می‌کند، BER_{tgt} می‌باشد.

اگر مدولاسیون تطبیقی با فرض $BER_{tgt}=10^{-3}$ در ۶ سیستم MIMO مختلف انجام گیرد، با توجه به روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) منحنی های بازده طیفی میانگین (شکل ۴) بدست می آیند، که شبیه به منحنی های متناظرشان در [۱۷] می باشند. همچنین این سیستم را به روش مونت کارلو شبیه‌سازی نمودیم که نتایج شبیه‌سازی نیز در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود نتایج تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی دارند. احتمال خطای بیت مدولاسیون تطبیقی بالا با فرض گیرنده ایده آل از $BER_{tgt}=10^{-3}$ کمتر است اما با فرض گیرنده معیوب از $BER_{tgt}=10^{-3}$ بیشتر است.

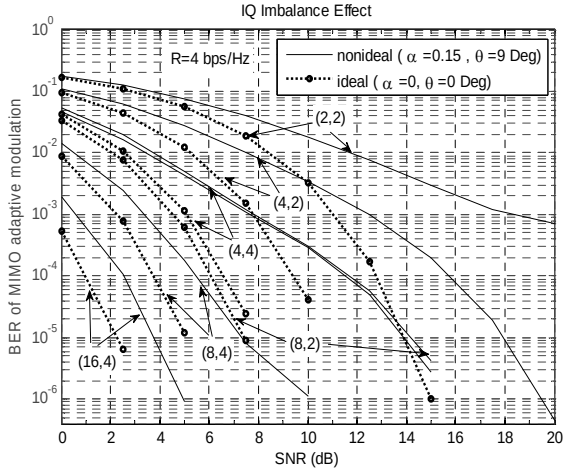


شکل۴: بازده طیفی متوسط مدولاسیون تطبیقی در MIMO، به ازاء ۶ سیستم MIMO مختلف

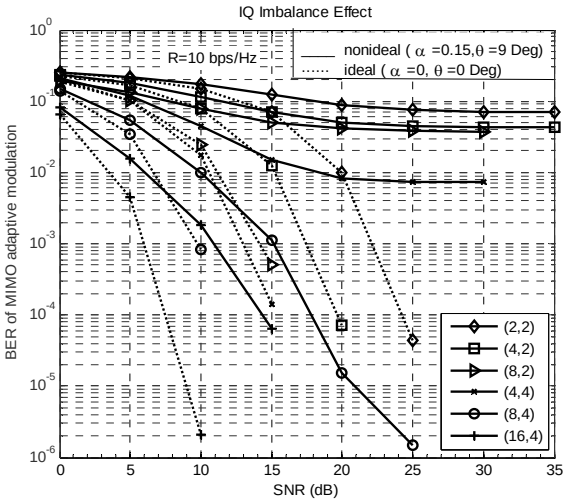
(با فرض $BER_{tgt}=10^{-3}$ و $SNR=\frac{P}{\sigma_n^2}$)

به منظور بررسی تأثیر عدم توازن IQ بر BER، فرض می‌شود که پارامترهای عدم توازن IQ در تمام مسیرهای گیرنده یکسان می‌باشند و مقادیرشان عبارت است از: $\alpha=0.15, \theta=9^\circ$. منحنی BER_{IQim} برحسب $SNR=\frac{P}{\sigma_n^2}$ در میانگین بازده طیفی ثابت را می‌توان از (۲۰) بدست آورد. برای دستیابی به یک میانگین بازده طیفی ثابت، متناظر با هر مقدار SNR، BER_{tgt} به روش عددی انتخاب شده است (BER_{tgt} در SNR های مختلف، مقادیری متفاوت انتخاب می‌شود تا میانگین بازده طیفی ثابت در SNR های مختلف حاصل شود). شکل‌های ۵ و ۶، BER_{IQim} را به ترتیب به ازاء $R=4\,bps/Hz$ و $R=10\,bps/Hz$ نشان می‌دهند. در این دو شکل احتمال خطای بیت حالت ایده آل (بدون عدم توازن IQ) نیز نشان داده شده است که می‌توان آن را با احتمال خطای بیت حالت غیر ایده آل مقایسه نمود.

همچنین احتمال خطای بیت مدولاسیون تطبیقی در MIMO به ازاء $R=10\,bps/Hz$، بر حسب θ و αهای مختلف در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب برای سیستم‌های (۲و۲) و (۴و۴) نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش θ و α، BER مدولاسیون تطبیقی در MIMO، خرابتر می‌شود.

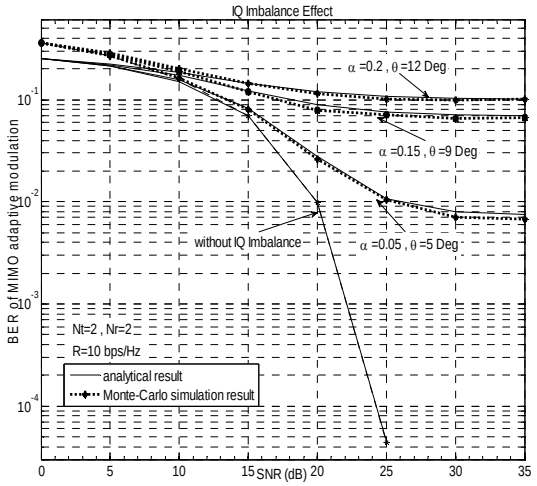


شکل۵: احتمال خطای بیت متوسط مدولاسیون تطبیقی در سیستم‌های MIMO تحت تأثیر عدم توازن IQ. $R=4\,bps/Hz$ و $\alpha=0.15, \theta=9^\circ$



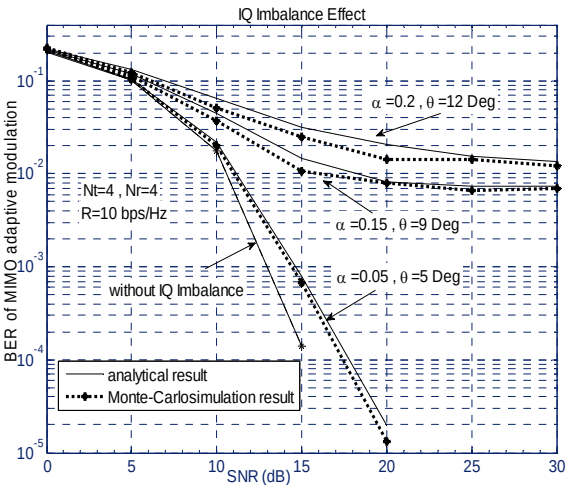
شکل۶: احتمال خطای بیت متوسط مدولاسیون تطبیقی در سیستم‌های MIMO تحت تأثیر عدم توازن IQ. $\alpha=0.15, \theta=9^\circ$ و $R=10\,bps/Hz$

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026



شکل۷: احتمال خطای بیت متوسط مدولاسیون تطبیقی در سیستم‌های MIMO تحت تأثیر عدم توازن IQ به ازاء θ و αهای مختلف. $N_t = 2, N_r = 2$ و $R = 10\ bps/Hz$

همچنین در این دو شکل نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو نیز نشان داده شده‌اند. همچنان که دیده می‌شود نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی به مقدار زیادی نزدیک می‌باشند که این بیانگر صحت روابط بدست آمده برای احتمال خطای بیت مدولاسیون تطبیقی در سیستم MIMO می‌باشد.

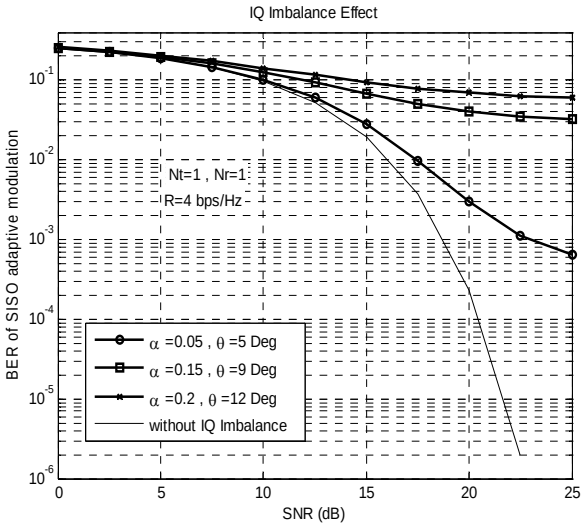


شکل۸: احتمال خطای بیت متوسط مدولاسیون تطبیقی در سیستم‌های MIMO تحت تأثیر عدم توازن IQ به ازاء θ و αهای مختلف. $N_t = 4, N_r = 4$ و $R = 10\ bps/Hz$

همچنین در این منحنی‌ها دیده می‌شود که با افزایش میانگین بازده طیفی، BER مدولاسیون تطبیقی در MIMO خرابتر می‌شود که همین را نیز انتظار داشتیم. همچنین با افزایش تعداد آنتنهای فرستنده و گیرنده در سیستم MIMO، BER مدولاسیون تطبیقی در MIMO کمتر خراب می‌شود. ساختار (۲و۲) بدترین بازده BER را دارد و ساختار (۴ و۱۶) بهترین بازده BER را دارا می‌باشد. در شکل ۹، BER مدولاسیون تطبیقی در SISO تحت تأثیر عدم توازن IQ نشان داده می‌شود. مقایسه شکل۵ و شکل۹ نشان می‌دهد که تاثیر عدم توازن IQ بر مدولاسیون تطبیقی در SISO بسیار مخربتر از تاثیر عدم توازن IQ بر مدولاسیون تطبیقی در MIMO می‌باشد.

۷- نتیجه گیری

یکی از معایب اصلی که از طریق قسمت RF گیرنده تبدیل مستقیم ایجاد می‌شود، عدم توازن IQ می‌باشد. عدم توازن IQ بازده سیستم را به مقدار زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مقاله، روابط بسته ای برای احتمال خطای بیت M-QAM تحت تاثیر عدم توازن IQ بیان شده است و نیز اثر این نقصان بر مدولاسیون M-QAM تطبیقی در سیستم‌های MIMO آنالیز شده است. به علاوه روابط تحلیلی برای BER مدولاسیون M-QAM تطبیقی در سیستم‌های MIMO تحت تأثیر عدم توازن IQ ، بدست آمده است. همانطور که انتظار می‌رفت، در نمودارها دیده شد که اگر مقدار پارامترهای عدم توازن IQ بزرگتر باشند، بازده BER خرابتر می‌شود. همچنین دیده شد که تاثیر تخریبی عدم توازن IQ بر سیستم SISO تطبیقی بیشتر از تاثیرش بر سیستم MIMO تطبیقی می‌باشد.



شکل۹: احتمال خطای بیت متوسط مدولاسیون تطبیقی در سیستم SISO تحت تأثیر عدم توازن IQ به ازاء θ و αهای مختلف. $R = 4\ bps/Hz$

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:02 +0330 on Wednesday November 25th 2026

سپاسگزاری

این مقاله تحت حمایت و پشتیبانی مرکـز تحقیقـات مخـابرات ایران (ITRC) انجام گردیده است.

مراجع

[۱] A. Mohammadi, S. Kumar, "Characterization of adaptive modulators in fixed wireless ATM networks," *Journal of Communications and Networks*, vol.۶ , no.۲, pp. ۱۲۳ – ۱۳۲, June. ۲۰۰۴.

[۲] S. T. Chung, A.J. Goldsmith, "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view," *IEEE Trans. Commun.*, vol.۴۹, no.۹, pp. ۱۵۶۱ – ۱۵۷۱, Sep. ۲۰۰۱.

[۳] C. Kose , D.L. Goeckel, "On power adaptation in adaptive signaling systems, " *IEEE Trans. Commun.*, vol.۴۸ , pp. ۱۷۶۹ – ۱۷۷۳, Nov. ۲۰۰۰.

[۴] D.L. Goeckel, "Adaptive coding for time-varying channels using out-dated fading estimates, " *IEEE Trans. Commun.*, vol.۴۷ , pp. ۸۴۴ – ۸۵۵, June ۱۹۹۹.

[۵] A.J. Goldsmith, S.-G. Chua, "Variable rate variable power MQAM for fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol.۴۵, no.۱۰, pp. ۱۲۱۸ – ۱۲۳۰, Oct. ۱۹۹۷.

[۶] B. Razavi, *RF Microelectronics*. Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, ۱۹۹۸.

[۷] A. Tarighat, R. Bagheri, and A. H. Sayed, "Compensation schemes and performance analysis of IQ imbalances in OFDM receivers," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.۵۳, no.۸, pp. ۳۲۵۷ – ۳۲۶۸, Aug. ۲۰۰۵.

[۸] J. Tubbax, B. Come, L. Van der Perre, S. Donnay, M. Engels, M. Moonen, and H. De Man, "Joint compensation of IQ imbalance and frequency offset in OFDM systems," *in Proc. IEEE Radio Wireless Conf., Aug*. ۲۰۰۳, pp. ۳۹–۴۲.

[۹] C. L. Liu, "Impacts of IQ imbalance on QPSK-OFDM-QAM detection," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol.۴۴, no.۳, pp. ۹۸۴ – ۹۸۹, Aug. ۱۹۹۸.

[۱۰] P. Baudian, F. Belveze, "Impact of RF impairments on a DS-CDMA receiver," *IEEE Trans. Commun.*, vol.۵۲, no.۱, pp. ۳۱ – ۳۶, Jan. ۲۰۰۴.

[۱۱] M. Windisch, G. Fettweis, "Performance degradation due to I/Q imbalance in multi-carrier direct conversion receivers: a theoretical analysis," *in Proc. IEEE ICC ۲۰۰۶*, June ۲۰۰۶.

[۱۲] M. R. Keshavarzi and A. Mohammadi, "Effect of IQ imbalance on bit error rate of M-QAM direct conversion receivers," ۱۴th International Conference on Telecommunications and ۸th Malaysia International Conference on Communications (ICT-MICC), ۲۴–۲۷ June, ۲۰۰۷.

[۱۳] M. Valkama, Y. Zou, and M. Renfors, "On I/Q imbalance effects in MIMO space-time coded transmission systems," Radio and Wireless Symposium ۲۰۰۶, pp. ۲۲۳ – ۲۲۶.

[۱۴] A. Tarighat, and A. H. Sayed, "MIMO OFDM receivers for systems with IQ imbalances," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.۵۳, no.۹, pp. ۳۵۸۳ – ۳۵۹۶, Sept. ۲۰۰۵.

[۱۵] T. C. W. Schenk, P. F. M. Smulders, and E. R. Fledderus, "Estimation and compensation of frequency selective TX/RX IQ imbalance in MIMO OFDM systems," *in Proc. ICC*, Turkey, ۲۰۰۶.

[۱۶] M. Dohler, "Virtual antenna arrays," Ph.D dissertation, King's College, London, U.K., ۲۰۰۳.

[۱۷] Z. Zhou, B. Vucetic, M. Dohler, and Y. Li, "MIMO systems with adaptive modulation," *IEEE Trans.* Vehicular *Technology*, vol.۵۴, no.۵, pp. ۱۸۲۸ – ۱۸۴۲, Sept. ۲۰۰۵.